

### Abstract

GEM-2 (Geophex Ltd., USA) is the new programmable broadband EM instrument for frequency-domain shallow depth geoelectrical investigations. Its main advantages are simultaneous measurements up to 15 frequencies with continuous 30 Hz data rate in bandwidth of 330 Hz to 48 kHz. Theoretical principles support optimal GEM-2 application in low ground resistivity regions ( $< 100 \Omega\text{m}$ , see fig. 1).

GEM-2 has been tested at two geophysically well known localities: ALBERTOV University testing area in Prague and NIŽBOR castle archaeological site 30 km SW from Prague. Results of GEM-2 measurements with medium frequency range 15 – 25 kHz are in a good agreement with former resistivity profiling measurements (see fig. 2 and 3).

### Stručná charakteristika aparatury GEM-2

Účelem příspěvku je seznámení s novou moderní multifrekvenční elektromagnetickou aparaturou GEM-2 od firmy Geophex Ltd.(USA). Tato aparatura je určena pro EM měření metodou DEMP (dipólového elektromagnetického profilování) ve frekvenčním rozsahu 330 Hz až 48 kHz. Měřené veličiny jsou reálná a imaginární složka sekundárního EM pole v jednotkách ppm primárního pole. Tyto hodnoty jsou přímo v aparatuře firemním softwarem invertovány na vodivosti, takže výstupem měření jsou kromě hodnot sekundárního EM pole též zdánlivé vodivosti pro jednotlivé měřené frekvence v jednotkách mS/m. Kromě toho výstupní data obsahují další užitečné parametry – magnetickou susceptibilitu pro jednotlivé frekvence a intenzitu pole síťového kmitočtu (50 Hz). Rychlost měření je určována vzorkovacím kmitočtem 25 Hz, což např. s pětinasobnou sumací dat reprezentuje 5 měření za vteřinu a při kontinuálním měření běžnou chůzí představuje krok měření 20 – 25 cm!

Největší předností aparatury GEM-2 je možnost simultánních multifrekvenčních měření až 10 frekvencí – prakticky se běžně využívá současné měření na pěti frekvencích. To je umožněno aplikací progresivních hardwarových prvků s využitím frekvenční syntézy vysílaného signálu na principu pulzní šířkové modulace pro generování zvolené kombinace frekvencí, přičemž samozřejmě s rostoucím počtem vysílaných frekvencí klesá jejich amplituda při konstantním maximálním výkonu generátoru. Přijímaný signál je zpětně rozložen na původně zvolené frekvence pomocí dekonvoluce s využitím pomocného signálu třetí kompenzační cívky, čímž je dosaženo maximálního potlačení primárního pole vysílače. Lze též naprogramovat navíc měření na frekvencích odlišných od generovaných a tímto způsobem monitorovat „elektromagnetický smog“, kromě již zmíněného automatického měření síťového kmitočtu. Samozřejmým doplňkem, jako ostatně u většiny moderních geofyzikálních aparatur, je možnost připojení běžných přijímačů signálů družicové navigace GPS pro automatickou registraci polohy při kontinuálním měření v terénu.

K výběru optimální kombinace frekvencí slouží režim registrace šumu v celém spektru frekvencí 0 - 48 kHz s automatickým zobrazením na připojeném počítači, který je ostatně nezbytný pro nastavení režimu měření a přesun dat z paměti aparatury, která má pouze miniaturní šestiřádkový displej se třemi ovládacími tlačítky.

---

<sup>1</sup> Doc. RNDr., CSc., Universita Karlova Praha, přírodovědecká fakulta, Albertov 6, Praha 2, knezj@tao.natur.cuni.cz

<sup>2</sup> RNDr., CSc., Universita Karlova Praha, přírodovědecká fakulta, Albertov 6, Praha 2, lz@natur.cuni.cz

<sup>3</sup> RNDr., Universita Karlova Praha, přírodovědecká fakulta, Albertov 6, Praha 2, dohnalj@natur.cuni.cz

<sup>4</sup> RNDr., Universita Karlova Praha, přírodovědecká fakulta, Albertov 6, Praha 2, janezde@natur.cuni.cz

Poměrně široký frekvenční rozsah aparatury GEM-2 nabízí mimo jiné též možnost zpracování naměřených dat pomocí principu frekvenční sondáže s cílem interpretace hloubkových odporových pseudořezů.

### Teoretické základy

Zdrojem EM pole je harmonický vertikální magnetický dipól – v případě aparatury GEM-2 vysílací cívka Tx (obr.1a). Od ní ve vzdálenosti  $r$  je umístěna vertikální přijímací cívka Rx a obě cívky jsou ve vzduchu ve výšce  $h$  nad homogenním poloprostorem o konečné elektrické vodivosti  $\sigma$  a magnetické permeabilitě  $\mu$ , rovné permeabilitě vakua. Vertikální složka sekundárního magnetického pole  $H_{z,s}$  v cívkce Rx, normovaná primárním polem  $H_{z,0}$ , je dána vztahem (Keller a Frischknecht, 1966)

$$\frac{H_{z,s}}{H_{z,0}} = r^3 \int_0^{\infty} R(\lambda) e^{-2\lambda h} J_0(\lambda r) \lambda^2 d\lambda, \quad (1)$$

kde  $J_0$  je Besselova funkce 1.druhu,  $\lambda$  je integrační proměnná a funkce  $R(\lambda)$  je rovna

$$R(\lambda) = \frac{\lambda - \sqrt{\lambda^2 - k^2}}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 - k^2}} \quad (2)$$

Vztahy (1) a (2) platí pro kvazistacionární přiblížení a pak vlnové číslo je  $k^2 = -i\omega\mu\sigma$ , kde  $i = \sqrt{-1}$  a kruhová frekvence  $\omega = 2\pi f$ . Integrál (1) je nutné řešit numericky (Frischknecht, 1967), pouze v případě  $h = 0$  lze odvodit analytický výraz (Kaufman a Keller, 1983)

$$\frac{H_{z,s}}{H_{z,0}} = \frac{2}{k^2 r^2} \left[ (9 + 9ikr - 4k^2 r^2 - ik^3 r^3) e^{-ikr} - 9 \right] \quad (3)$$

Poměr  $\frac{H_{z,s}}{H_{z,0}}$  je komplexní veličina, skládající se z reálné části  $\text{Re} \frac{H_{z,s}}{H_{z,0}} = I$  (inphase) a z imaginární části  $\text{Im} \frac{H_{z,s}}{H_{z,0}} = Q$  (quadrature).

Průběh veličin  $I, Q$  nad nemagnetickým homogenním poloprostorem je znázorněn na obr.1a.

Jsou uvedeny křivky pro tři hodnoty  $\frac{2h}{r}$ , v závislosti na indukčním čísle  $B = \frac{r}{\delta}$ , kde hloubka

skinu  $\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}$ . Křivka  $\frac{2h}{r} = 0.5$  odpovídá prakticky např. aparatuře EM-31 Geonics ve

výšce 1m ( $r = 3.66\text{m}$ ) a křivka  $\frac{2h}{r} = 1.2$  platí pro aparaturu GEM-2 ( $h = 1\text{m}$ ,  $r = 1.67\text{m}$ ). Jsou-li

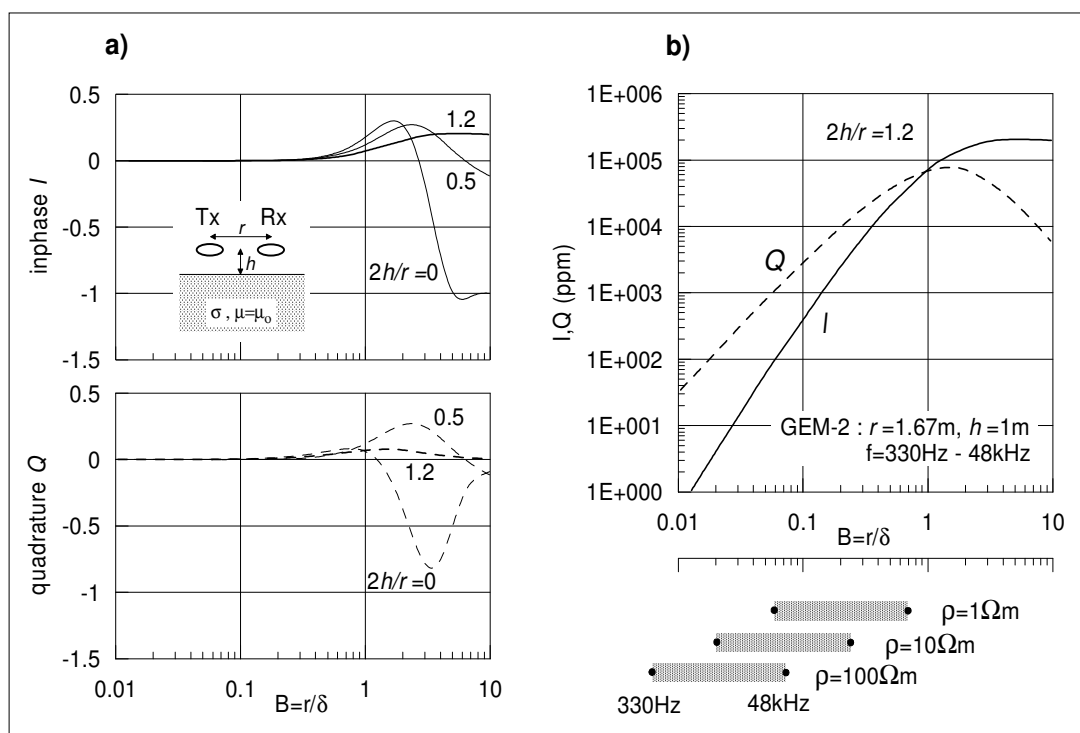
obě cívky přímo na povrchu země, pak  $\frac{2h}{r} = 0$ . Na grafech lze rozlišit tři charakteristické úseky:

blízkou zónu ( $B \ll 1$ , odporový limit), střední zónu a vzdálenou zónu ( $B \gg 1$ , induktivní limit).

Křivky pro aparaturu GEM-2 jsou též vyneseny v logaritmickém měřítku a pro odpovídající kalibraci přístroje (ppm) na obr.1b. Je patrné, že v běžných odporových poměrech probíhá měření s touto aparaturou za podmínek blízké až střední zóny.

Měřené hodnoty  $I, Q$  lze převést, v případě nehomogenního poloprostoru, na zdánlivou vodivost  $\sigma_z$ , resp. zdánlivý odpor  $\rho_z$ . Nejčastěji se využívá závislosti  $Q(B)$  a princip transformace je zřejmý z obr.1b:  $Q \rightarrow B(r, \omega, \mu = \mu_0, \sigma) \rightarrow \sigma = \sigma_z$ . Je však třeba vzít úvahu případnou dvojznačnost hodnot  $\sigma_z$ .

V případě magnetického prostředí ( $\mu = \mu_r \mu_0$ ,  $\mu_r > 1$ ) je možné, za určitých předpokladů, určit i zdánlivou magnetickou susceptibilitu  $\kappa_z$  (Huang a Fraser, 2000). Využívá se k tomu specifický průběh složky  $I$  nad homogenním poloprostorem s  $\mu_r > 1$ : frekvenčně nezávislé záporné hodnoty  $I$  pro  $B \ll 1$ . Z hodnot na velmi nízkých frekvencích je vypočtena zdánlivá relativní magnetická permeabilita  $\mu_{r,z}$  a v jednotkách SI pak  $\kappa_z = \mu_{r,z} - 1$ .

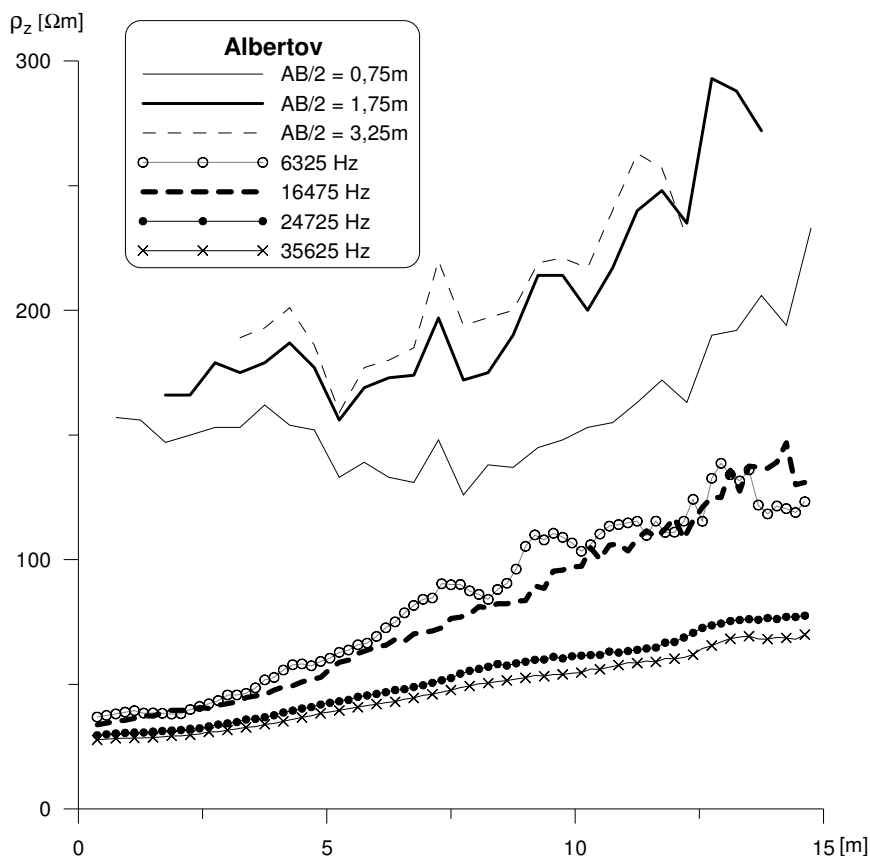


**Obr.1** Průběh složek  $I, Q$  v případě nemagnetického homogenního poloprostoru : a) hodnoty v lineárním měřítku pro  $\frac{2h}{r} = 0$  (podle vztahu (3)),  $\frac{2h}{r} = 0.5$  (Frischknecht, 1967) a  $\frac{2h}{r} = 1.2$  (Won, 2003). b) hodnoty v logaritmickém měřítku a ppm škále pro  $\frac{2h}{r} = 1.2$  (aparatura GEM-2); uveden je též rozsah odpovídajících indukčních čísel  $B$  v prostředí 1, 10 a 100  $\Omega\text{m}$

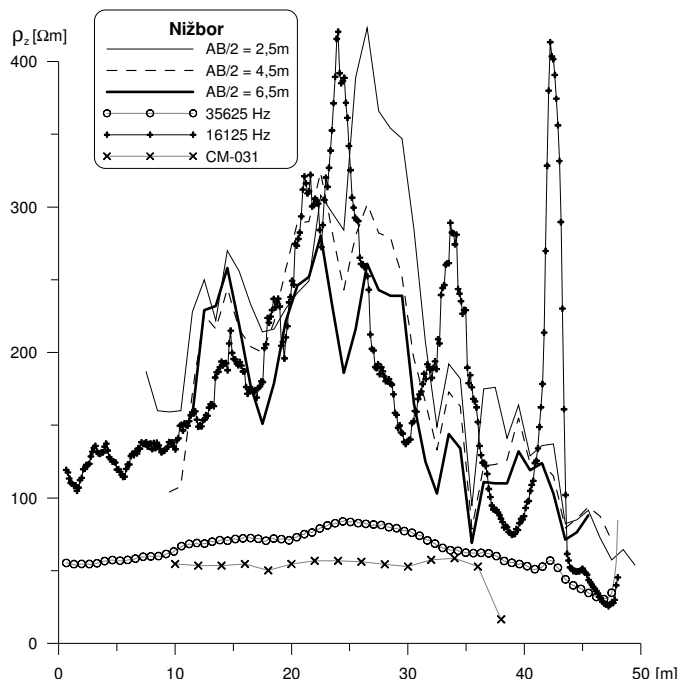
## Prvé zkušenosti s aparaturou GEM-2

Pro otestování aparatury GEM-2 jsme využili zkušební profil v areálu Albertova v prostoru travnatého pozemku před Ústavem patologie FVL UK, kde byly již dříve monitorovány sezónní změny zdánlivých měrných odporů klasickým odporovým profilováním i multielektrodovou tomografií (Novák, 2003), a měření na lokalitě Nižbor u Berouna v prostoru hradu, kde byl v letech 2000 – 2002 prováděn detailní geofyzikální průzkum pro archeologické účely (Dohnal a kol., 2004).

Pro výběr frekvencí bylo zaregistrováno celkové spektrum šumu a po jeho analýze byly vybrány frekvence 6325 Hz, 16475 Hz, 24725 Hz a 35625 Hz. Nejnižší frekvence byla původně zkoušena v pásmu stovek a prvních tisíců Hz, avšak silné rušení prakticky znemožňuje v daném prostředí měření v pásmu pod 5 kHz. Jako kompromis byl zvolen počet 4 frekvencí pro současné měření. Ukázka z měření na lokalitě Albertov je na obr. 2. Průběh odporových křivek z měření aparaturou GEM-2 na frekvencích 6325 Hz a 16475 Hz nejlépe odpovídá průběhu dat odporového profilování s rozestupy AB/2 1,75 m a 3,25 m. Odporové křivky z měření na frekvencích 24725 Hz a 35625 Hz mají odlišný charakter, který je blíže k průběhu křivky odporového profilování s rozestupem 0,75 m při zhruba polovičních hodnotách odporů. Nesoulad odporových křivek získaných aparaturou GEM-2 na začátku profilu do metráže 5 je způsoben blízkostí kovového oplocení.



**Obr.2** Lokalita Albertov – porovnání výsledků měření GEM-2 na frekvencích 6325 Hz, 16475 Hz, 24725 Hz a 35625 Hz s odporovým profilováním s rozestupy AB/2 0,75 m, 1,75m a 3,25 m



**Obr.3** Lokalita Nižbor – výsledky měření GEM-2 na frekvencích 16125 Hz a 35625 Hz, odporového profilování s rozestupy AB/2 2,5 m, 4,5 m a 6,5 m a měření konduktometrem CM-031

Na další ukázce z lokality Nižbor (obr. 3) jsou zobrazeny výsledky měření na 50m dlouhém profilu, kde jsou prezentovány 3 rozestupy odporového profilování z multielektrodového měření společně s měřením DEMP aparaturou CM-031 (Geofyzika Brno). Výsledky měření GEM-2 na frekvenci 16125 Hz se dobře korelují s odporovým měřením při posunu ve střední části profilu o 2-3m, způsobeném nepravidelným pohybem při chůzi na vzdálenost 50m. Výrazná anomálie na metrži 42,5m je projevem železného krytu vodovodní přípojky. Pozoruhodná je téměř dokonalá shoda hodnot zdánlivých odporů pro rozstup odporového profilování AB/2 2,5 m s výsledky GEM-2 na frekvenci 16125 Hz. Na frekvenci 35625 Hz jsou opět výrazně nižší odporové hodnoty. Konduktometrická měření aparaturou CM-031 mají odlišný charakter a neregistrují odporové anomálie.

### Závěr

Měření aparaturou GEM-2 na obou uvedených lokalitách potvrdila vcelku dobrou rozlišovací schopnost detekce odporových nehomogenit v rozpětí zdánlivých měrných odporů 50 – 400 ohmmetrů ve frekvenčním rozsahu 15 – 25 kHz. Stěžejní otázkou širší aplikace této aparatury je využitelnost nízkých frekvencí do 5 – 6 kHz a ověření reálnosti inverze multifrekvenčních měření na hloubkové odporové pseudořezy jako v odporových multielektrodových metodách.

Hlavní předností aparatury GEM-2 je vysoká efektivita terénních prací, která je limitována pouze rychlostí chůze operátora po terénu. Nabízí se i možnost pohybu aparatury pomocí upraveného dopravního prostředku po souši nebo po vodní hladině. Nezanedbatelnou výhodou aparatury GEM-2 jsou i malá hmotnost (4 kg včetně baterií) a rozměry, které ulehčují dlouhodobý pohyb v terénu při plynulém způsobu měření.

*Tento výzkum byl realizován za finanční podpory výzkumného záměru MŠMT č.CEZ:J13/98:113100 006. Aparatura byla poskytnuta firmou GEO Group a.s. v rámci řešení projektu MPO PROGRES ev.č. FF-P2/019.*

## **Použitá literatura**

- [87] Dohnal, J., Jáně, Z., Kněz, J., Valenta, J., Vilhelm, J., Zima, L. (2004): Hrad Nižbor – poznatky komplexního geofyzikálního průzkumu v letech 2000 – 2002.- *Castelloologica Bohemica*, 9, p.291-304.
- [88] Frischknecht, F.C. (1967): Fields about an oscillating magnetic dipole over a two-layer earth and application to ground and airborne electromagnetic surveys. – *Q.Colorado School Mines*, v.62, no.1, p.1-326.
- [89] Huang, H., Fraser, D.C. (2000): Airborne resistivity and susceptibility mapping in magnetically polarizable areas. – *Geophysics*, vol.65, no.2, p.502-511.
- [90] Kaufman, A.A., Keller, G.V. (1983): *Frequency and transient soundings*. – Elsevier, Amsterdam, 685p.
- [91] Keller, G.V., Frischknecht, F.C. (1966): *Electrical methods of geophysical prospecting*. – Pergamon, London, 519p.
- [92] Novák, P. (2003): Long-time monitoring of soil water content and apparent resistivity.- *Proceedings of the 9<sup>th</sup> Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, Prague, O-74.
- [93] Won, I.J. (2003): Small frequency-domain electromagnetic induction sensors. – *The Leading Edge*, vol.22, no.4, p.320-322.